

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO PAULO
INSTITUTO DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA

OLÍVIA OLIVEIRA

**ANÁLISE DO COMPORTAMENTO MICROESTRUTURAL E DAS
PROPRIEDADES MECÂNICAS DE AÇOS BAIXO CARBONO
SUBMETIDOS A DIFERENTES TEMPERATURAS DE RECOZIMENTO**

São José dos Campos

2019

OLÍVIA OLIVEIRA

**ANÁLISE DO COMPORTAMENTO MICROESTRUTURAL E DAS
PROPRIEDADES MECÂNICAS DE AÇOS BAIXO CARBONO
SUBMETIDOS A DIFERENTES TEMPERATURAS DE RECOZIMENTO**

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado à Universidade Federal de
São Paulo como requisito parcial para
obtenção do grau de Bacharel em
Engenharia de Materiais.

Orientadora: Profa. Dra. Aline Capella de
Oliveira

Coorientador: Tiago Nisio Gonçalves

São José dos Campos

2019

OLÍVIA OLIVEIRA

**ANÁLISE DO COMPORTAMENTO MICROESTRUTURAL E DAS PROPRIEDADES
MECÂNICAS DE AÇOS BAIXO CARBONO SUBMETIDOS A DIFERENTES
TEMPERATURAS DE RECOZIMENTO**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à
Universidade Federal de São Paulo como
requisito parcial para obtenção do grau de
Bacharel em Engenharia de Materiais.

BANCA EXAMINADORA:

Profa. Dra. Aline Capella de Oliveira

Universidade Federal de São Paulo

Orientadora

Tiago Nisio Gonçalves

Gerdau Aços Longos S.A.

Coorientador

Profa. Dra. Kátia Ragina Cardoso

Universidade Federal de São Paulo

Na qualidade de titular dos direitos autorais, em consonância com a Lei de direitos autorais nº 9610/98, autorizo a publicação livre e gratuita desse trabalho no Repositório Institucional da UNIFESP ou em outro meio eletrônico da instituição, sem qualquer ressarcimento dos direitos autorais para leitura, impressão e/ou download em meio eletrônico para fins de divulgação intelectual, desde que citada a fonte.

Ficha catalográfica elaborada pela Biblioteca da UNIFESP São José dos Campos com os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

Oliveira, Olívia.

Análise do comportamento microestrutural e das propriedades mecânicas de aços baixo carbono submetidos a diferentes temperaturas de recozimento. / Olívia Oliveira. 2019.
49f.

Trabalho de conclusão de curso Engenharia de Materiais – Universidade Federal de São Paulo, Instituto de Ciência e Tecnologia, 2019.

Orientador: Aline Capella de Oliveira.

Título em outro idioma: Analysis of microstructural behavior and mechanical properties of low carbon steels submitted to different annealing temperatures.

1. Aço. 2. Recozimento. 3. Trefilação. 4. Microestrutura. I. Oliveira, Aline Capella de. II. Trabalho de conclusão de curso Engenharia de Materiais – Universidade Federal de São Paulo, Instituto de Ciência e Tecnologia. III. Análise do comportamento microestrutural e das propriedades mecânicas de aços baixo carbono submetidos a diferentes temperaturas de recozimento.

AGRADECIMENTOS

A Deus, pela vida, pela possibilidade de realizar mais um sonho e por todo seu amor e cuidado comigo para que eu fosse capaz de superar as dificuldades e vencer os desafios.

Ao meu pai, Antonio, e meus irmãos, Matheus e Junior, por serem minha maior motivação nessa vida e por acreditarem em mim sempre.

Ao meu amor, Ciro Luiz, por estar ao meu lado torcendo por mim, me incentivando e encorajando.

A minha tia e amiga Maria Ester, por ser meu maior exemplo.

A toda minha família que, de alguma forma, esteve comigo durante esses anos.

A todo o corpo docente e técnicos da Engenharia de Materiais da UNIFESP, em especial, à Profa. Dra. Aline Capella de Oliveira, por aceitar ser minha orientadora neste trabalho e por fornecer toda ajuda para que ele se concretizasse.

A Gerdau Aços Longos S. A., pela confiança e pela possibilidade de desenvolver este projeto durante meu período de estágio.

Aos meus colegas de curso que se tornaram grandes amigos, por todos os momentos juntos, pela disposição em me ajudar e por terem feito a diferença na minha vida.

Por último, a minha mãe, Marisa Regina que, apesar de não poder vivenciar fisicamente esse momento tão especial comigo, se fez e faz presente no meu coração todos os dias.

RESUMO

Arames de aço podem ser classificados de diversas maneiras, seja pela forma, pela composição química ou por suas aplicações comerciais. Os aços baixo carbono tem diversas aplicações e abrangem um intervalo considerável de composições. Estes aços são utilizados quer sem tratamento térmico, isto é, no estado encruado, quer no estado recozido, submetidos a um tratamento térmico de recozimento ou normalização após a etapa de trefilação. Quando recozidos, os aços baixo carbono utilizados em arames, apresentam propriedades mecânicas mais uniformes e são mais indicados a operações de conformações de maior exigência. Em suma, o arame com baixo teor de carbono sofre um processo de trefilação e posteriormente passa por um tratamento térmico de recozimento com o objetivo de adquirir as propriedades mecânicas desejadas ou quando se torna frágil demais para aplicação determinada. Este recozimento visa proporcionar um aumento na ductilidade do material e, conseqüentemente, melhorar a conformabilidade do aço. Desta forma, levando em consideração tais informações, visou-se realizar neste trabalho, tratamentos térmicos em aços baixo carbono (SAE 1010) utilizando mufas aquecidas em diferentes temperaturas máximas de recozimento (690°C, 710°C e 740°C). Em seguida a estes tratamentos, as amostras foram dimensionadas e preparadas metalograficamente para que os ensaios mecânicos de tração uniaxial e microscopia óptica pudessem ser realizados. Através destas análises tornou-se possível investigar e compreender a influência da temperatura máxima de recozimento no produto obtido. De maneira geral, os resultados gerados indicam que, quanto maior a temperatura máxima de recozimento aplicada durante o tratamento térmico, menores são os valores de limite médio de resistência à tração e maiores são os tamanhos médios de grão obtidos nas microestruturas, resultando num material mais dúctil, com melhores propriedades para a aplicação na construção civil, atendendo os valores estabelecidos para arames recozidos pela norma ABNT NBR 5589.

Palavras-chaves: Aço. Recozimento. Trefilação. Microestrutura.

ABSTRACT

Steel wires can be classified in different ways, either by its shape, chemical composition, or by its commercial applications. The low carbon steels alloys have various applications, covering a considerable range of compositions. These steels can be used either without being heat treated, in their hard drawn state, or in their annealed state, going under annealing or normalizing heat treatment after the cold drawing stage. When annealed, the low carbon steels for wires, displays more consistent mechanical properties and are better suited for operations of forming. In conclusion, the low carbon wire goes through a process of cold drawing, and later on through an annealing heat treatment, aiming to acquire the desired mechanical properties or when it becomes too fragile to the determined application. The annealing of the material provides an increase in its ductility and, consequently, improves the steel's conformability. Taking into consideration these pieces of information, this thesis is focused on heat treating low carbon steels (SAE 1010), in different annealing maximum temperatures (690°C, 710°C e 740°C). Following these treatments, the samples were sized and metallographically prepared so that mechanical tests of traction and optical microscopy could be done. Through these analyzes it became possible to investigate and understand the influence of the maximum annealing temperature on the obtained product. In general, the results indicate that the higher the maximum annealing temperature in the heat treatment is, the lower the numbers of traction resistance are and the bigger are the grain sizes obtained in the microstructures, resulting in a more ductile material, with better properties for application in civil construction, meeting the values established for annealed wires by ABNT NBR 5589.

Keywords: Steel. Annealing. Wire drawing. Microstructure.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Diagrama de Fases: Ferro – Carbetto de Ferro (Fe-Fe ₃ C).....	20
Figura 2 – Microestrutura perlítica, com aumento 2000x e ataque com Nital.....	21
Figura 3 – (a) Desenho esquemático de uma bancada de trefilação. (b) seção transversal de uma matriz (fieira) de trefilação.....	23
Figura 4 – Modelo de material policristalino (a) antes da deformação plástica e (b) depois da deformação plástica (microestrutura de grãos alongados).....	24
Figura 5 – Tratamento térmico de recozimento. Microestrutura durante (a) Início do tratamento. (b) Metade do tratamento. (c) Final do tratamento.....	25
Figura 6 – Comparação entre os aspectos do diagrama tensão-deformação de um aço recozido e um aço encruado.....	27
Figura 7 – Arame recozido BWG 18 - 1,25 mm.....	27
Figura 8 – Feixes de arames trefilados 1,25mm.....	28
Figura 9 – Forno Mufla FORNITEC.....	30
Figura 10 – Termopar mineral ligado ao multímetro.....	30
Figura 11 – Fluxograma de preparação das amostras para caracterização microestrutural.....	32
Figura 12 – Exemplificação do método utilizado para medição de grãos.....	33
Figura 13 – Diâmetros obtidos das amostras tratadas conforme Grupo 1 (740°C).....	34
Figura 14 – Diâmetros obtidos das amostras tratadas conforme Grupo 2 (710°C).....	34
Figura 15 – Diâmetros obtidos das amostras tratadas conforme Grupo 2 (690°C).....	35
Figura 16 – Diâmetros obtidos das amostras não tratadas termicamente.....	35

Figura 17 - Histograma Limite de Resistência à Tração Médio para os Grupos 1, 2 e 3..	38
Figura 18 – Boxplot Limite de Resistência à Tração para os Grupos 1, 2 e 3.....	38
Figura 19 (a) – Amostra trefilada sem tratamento térmico com aumento 125x. Ataque Nital 3%.....	41
Figura 19 (b) – Amostra trefilada sem tratamento térmico com aumento 250x. Ataque Nital 3%.....	41
Figura 20 (a) – Amostra recozida a 740°C com aumento 125x. Ataque Nital 3%.....	42
Figura 20 (b) - Amostra recozida a 740°C com aumento 250x. Ataque Nital 3%.....	43
Figura 21 (a) – Amostra recozida a 710°C com aumento 125x. Ataque Nital 3%.....	44
Figura 21 (b) – Amostra recozida a 710°C com aumento 250x. Ataque Nital 3%.....	44
Figura 22 (a) – Amostra recozida a 690°C com aumento 125x. Ataque Nital 3%.....	45
Figura 22 (b) – Amostra recozida a 690°C com aumento 250x. Ataque Nital 3%.....	45

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Ciclos de tratamentos térmicos de recozimento em forno mufla para avaliação dos grupos de amostras 1, 2 e 3 de arame 1,25mm.....	28
Tabela 2: Resultado dos Testes de Normalidade de Anderson-Darling para todos os grupos de amostras analisadas.....	33
Tabela 3: Diâmetro Médio, Força Máxima Média e Limite de Resistência à Tração Médio para todos os grupos (1, 2, 3 e NT).....	35
Tabela 4: Tamanhos Médios de Grão obtidos para os Grupos 1, 2 e 3.....	38

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

Fe-C	Ferro Carbono
%p	Porcentagem em peso de Carbono
CCC	Cúbica de Corpo Centrado
CFC	Cúbica de Face Centrada
Fe ₃ C	Carbeto de Ferro ou Cementita
A ₁	Linha da transformação de austenita para ferrita no diagrama Fe-C
A ₃	Linha da transformação de austenita para cementita no diagrama Fe-C
BWG	Birmingham Wire Gauge
CP	Corpo de Prova
LRT	Limite de Resistência à Tração
MO	Microscopia Óptica
NBR	Norma Brasileira Regulamentadora
NT	Não Tratadas

LISTA DE SÍMBOLOS

γ	Austenita
δ	Ferrita
μm	Micrometro

SUMÁRIO

1. Introdução	14
2. Objetivos e Justificativas	16
2.1 Objetivos	16
2.2 Justificativas	16
3. Revisão da Literatura.....	18
3.1 Classificação dos Aços	18
3.2 As fases do Diagrama Ferro – Carbetto de Ferro (Fe-Fe ₃ C).....	19
3.3 Desenvolvimento Microestrutural do Aço	20
3.4 Processo de Trefilação.....	22
3.5 Fenômeno de Encruamento.....	23
3.6 Tratamento Térmico de Recozimento	24
3.7 Arames Recozidos	26
4. Material e Métodos	28
4.1 Material	28
4.2 Métodos	28
4.2.1 Preparação dos Feixes	28
4.2.2 Ciclos Térmicos	28
4.2.3 Caracterização das Amostras.....	30
5. Resultados e Discussões	34
5.1 Análise Estatística das Amostras	34
5.2 Caracterização Mecânica.....	37
5.3 Caracterização Microestrutural	39
6. Conclusões.....	47
7. Referências	48

1. Introdução

O crescente fenômeno da industrialização e modernização dos países faz com que exista uma demanda crescente por aços que apresentem propriedades mecânicas, como ductilidade, resistência e durabilidade, cada vez melhores. De acordo com a *World Steel Association*, a produção de aço bruto entre os anos de 1950 e 2017 passou de 189 para 1.689 milhões de toneladas, um crescimento extraordinário que mostra a enorme demanda e a grande versatilidade deste material (WORLDSTEEL, 2018).

Diante da variedade de produtos que podem ser produzidos a partir dos aços, arames (ou fios) são produzidos pelo processo de trefilação, apresentando seção transversal uniforme, geralmente circular, muito pequena em relação ao seu comprimento. As dimensões da seção variam dentro de bitolas muito amplas, entre 0,02 mm até cerca de 25 mm. Para a fabricação de arames, parte-se do que é conhecido como “fio-máquina”, que pode ser obtido por laminação a quente de barras, em geral, quadradas (CHIAVERINI, 1990).

O processo de trefilação, geralmente realizado em temperatura ambiente, consiste em puxar o material através de uma matriz, conhecida como fieira, por meio de uma força de tração a ele aplicada na saída da mesma (NUNES, 2008). Os princípios envolvidos na trefilação de barras, vergalhões e arames são basicamente os mesmos, embora os equipamentos utilizados variem para os diversos modelos e tamanhos de produtos (DIETER, 1986).

Para a produção de arames, são comumente utilizados aços de baixo carbono (com porcentagem de carbono abaixo de 0,20%). Sabe-se, contudo, que no trabalho a frio, os mecanismos de recuperação e recristalização não operam nos materiais metálicos (DIETER, 1986). Neste caso, à medida que o material é deformado ocorre o fenômeno de encruamento, onde a resistência mecânica do material aumenta e a ductilidade diminui, em função do aumento da densidade de discordâncias e da diminuição de sua mobilidade. Para evitar que haja a ruptura do material, antes de se atingir as dimensões desejadas e outras dificuldades, as operações de deformação a frio, em geral, são realizadas em etapas, com operações de recozimento intermediário que, apesar de elevarem o custo envolvido do processo, permitem a produção de uma

maior diversidade de materiais com diferentes propriedades (COSTA E SILVA, 1988; CHIAVERINI, 1990).

O tratamento térmico de recozimento consiste no aquecimento do material em faixas de temperatura próximas à transformação eutetóide seguido de resfriamento lento, e tem como objetivos principais: aliviar as tensões residuais existentes no material, modificar as propriedades mecânicas e/ou adquirir uma determinada microestrutura desejada. É dividido em três tipos de recozimento principais: recozimento pleno, subcrítico ou intercrítico (COSTA E SILVA, 1988). Quando recozidos, os arames de aço baixo carbono apresentam, portanto, propriedades mecânicas mais uniformes e são mais indicados a operações de conformações de maior exigência, como na construção civil.

Assim sendo, como parte de um projeto que tinha como objetivo principal o aumento de capacidade de um forno contínuo a partir da manutenção do ciclo térmico aplicado para um determinado grupo de materiais, esse trabalho visou estudar - em escala laboratorial - o comportamento de feixes de arames de aço baixo carbono (SAE 1010) com um diâmetro de 1,25 mm em diferentes temperaturas máximas de recozimento, a fim de avaliar seu comportamento microestrutural e mecânico após emprego do tratamento térmico para que, desta forma, fosse possível planejar e selecionar um ciclo que garanta, acima de tudo, as propriedades mecânicas do material recozido conforme prescreve a norma ABNT NBR 5589.

2. Objetivos e Justificativas

2.1 Objetivos

O principal objetivo deste trabalho consistiu em estudar a influência da temperatura máxima de recozimento no comportamento microestrutural e nas propriedades mecânicas de arames de aço baixo carbono, visando atender requisitos e propriedades indispensáveis para aplicação na construção civil, prescritos na norma ABNT NBR 5589, como valores de Limite de Resistência à Tração menores que 55 kg/mm².

Especificamente, este trabalho visou atender os seguintes objetivos específicos:

I. empregar tratamento térmico em feixes de arames considerando diferentes temperaturas máximas de recozimento, as quais foram selecionadas com a finalidade de simular as condições existentes em um forno contínuo e as temperaturas máximas de recozimento atingíveis por ele (690° C, 710° C e 740° C);

II. realizar ensaios de tração em amostras, tratadas sob diferentes condições, para avaliação de suas propriedades mecânicas;

III. analisar microestruturalmente amostras tratadas termicamente, comparando resultados obtidos com amostras trefiladas sem tratamento térmico de recozimento;

IV. correlacionar os resultados obtidos, sugerindo em escala, os dados mais interessantes, visando a aplicação desejada.

2.2 Justificativas

De acordo com a *World Steel Association*, a crescente demanda por aços com propriedades mecânicas específicas, para as mais diversas aplicações, tem despertado nas empresas a necessidade de otimização e melhorias contínuas dos processos de produção de aço que são utilizados atualmente e dos que estão sendo desenvolvidos.

Atrelado à essa crescente demanda, é importante se atentar à capacidade produtiva das empresas, isto é, garantir que os procedimentos executados garantam um processo robusto, de qualidade e lucrativo, visto que as perspectivas para este mercado continuam sendo boas (WORDLSTEEL, 2018).

Levando em consideração tais informações, este trabalho propõe analisar a principal etapa envolvida no processo de produção de arames de aço, que é o tratamento térmico de recozimento. Esta etapa, por sua vez, é responsável por garantir propriedades

mecânicas exigidas pelo mercado, para que assim, estes produtos possam ser aplicados e atendam aos requisitos solicitados.

Desta forma, por meio de variações de ciclos térmicos para aços baixo carbono, as propriedades mecânicas e microestruturais dos produtos obtidos serão analisadas e comparadas entre si. Com tais informações, objetiva-se propor um ciclo que seja rápido e eficiente, isto é, capaz de atender a quantidade de produto demandada, sem deixar de garantir as propriedades requisitadas, fator indispensável em qualquer processo produtivo (FLEURY, 1993).

3. Revisão da Literatura

3.1 Classificação dos Aços

Aços são ligas ferro-carbono (Fe-C) que podem conter concentrações expressivas de outros elementos de liga. Essa característica possibilita a produção de diversas ligas com diferentes composições e/ou tratamentos térmicos diferentes. Em geral, as propriedades mecânicas dos aços são afetadas com a concentração de carbono na matriz ferrosa, sendo normalmente inferior a 1,0%p (CALLISTER, 2008).

Para classificar os aços, comumente utiliza-se a concentração de carbono existente, da seguinte maneira:

I. aços com baixo teor de carbono (ou aços baixo carbono) são os mais comercialmente produzidos e contém, geralmente, percentuais de carbono menores do que 0,25%p. Essas ligas possuem baixa resistência mecânica, mas apresentam boa ductibilidade e tenacidade, sendo consideradas ótimas para o trabalho a frio e soldagem, além de serem as que apresentam menores custos de produção. Aplicações comuns incluem: componentes de automóveis, formas estruturais e chapas usadas em tubulações, pontes, entre outros (CALLISTER, 2008);

II. aços com médio teor de carbono apresentam concentrações de carbono entre 0,25 e 0,60%p. Essas ligas possuem baixa capacidade de endurecimento e podem ser termicamente tratadas, com sucesso, apenas em seções finas e com taxas de resfriamento muito rápidas. Suas aplicações incluem: rodas e trilhos de trens, engrenagens, peças de máquinas e componentes estruturais de alta resistência (CALLISTER, 2008);

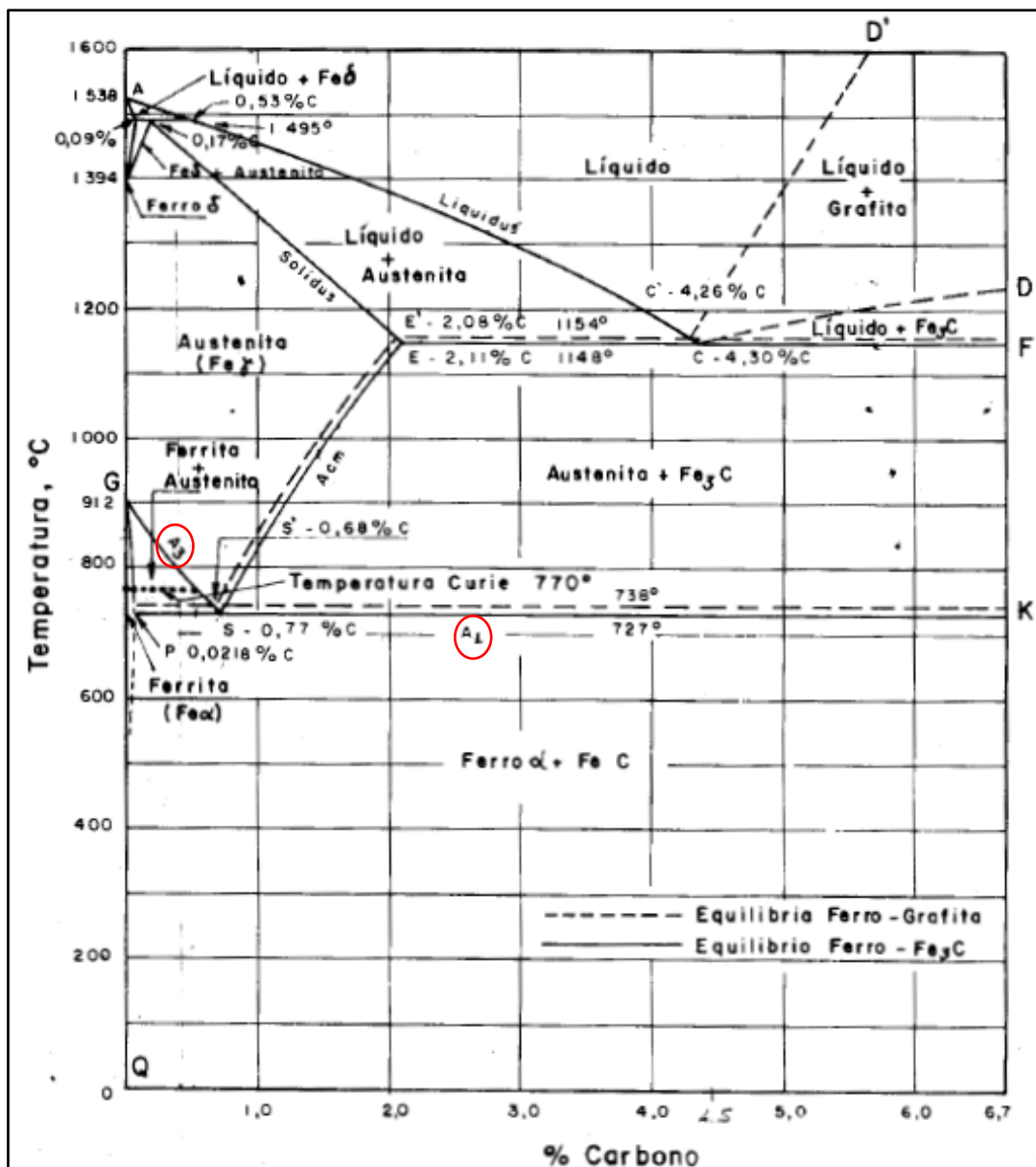
III. aços com alto teor de carbono possuem teores de carbono entre 0,60 e 1,4%p, são os mais duros e resistentes e, desta forma, os menos dúcteis. São especialmente resistentes ao desgaste e, por isso, usados como ferramentas de corte, matrizes para moldar e conformar metais, lâminas de corte, etc. (CALLISTER, 2008).

3.2 As fases do Diagrama Ferro – Carbeto de Ferro (Fe-Fe₃C)

No diagrama de fases, mostrado na Figura 1 a seguir, é possível visualizar as diversas fases que as ligas de aço podem obter a depender, principalmente, da composição química da liga e do tratamento térmico que ela foi submetida e, conseqüentemente, compreender qual microestrutura e propriedades mecânicas serão obtidas.

De maneira geral, podemos dizer que o ferro puro ao ser aquecido, passa por duas mudanças de estrutura cristalina antes de fundir. A forma estável à temperatura ambiente, chamada de ferrita, ou ferro α , possui estrutura cristalina cúbica de corpo centrado (CCC) mas, ao atingir a temperatura de 912°C, a ferrita passa por uma transformação polimórfica para austenita, ou ferro γ , que possui uma estrutura cristalina cúbica de face centrada (CFC). Essa estrutura permanece até 1394°C, temperatura na qual a estrutura cristalina CFC retorna a CCC, numa fase conhecida como ferrita δ , que é fundida quando a temperatura atinge 1538°C. De acordo com o diagrama esquematizado, percebe-se que o eixo das composições se estende apenas até 6,70%p C, isto acontece pois é neste intervalo de concentrações que se encontra a grande maioria dos aços utilizados. Além disso, é justamente nessa concentração (6,7%p C) que se forma o composto intermediário Fe₃C, conhecido como carbeto de ferro ou cementita (CALLISTER, 2008).

Figura 1 – Diagrama de Fases: Ferro – Carbetto de Ferro (Fe-Fe₃C).



Fonte: CHIAVERINI (1990).

3.3 Desenvolvimento Microestrutural do Aço

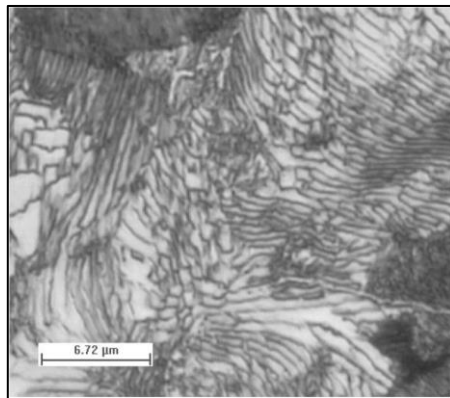
Na composição 0,77%p C do diagrama ferrita-cementita existe uma reação eutetóide, que corresponde a uma reação onde uma fase sólida se transforma em outras duas fases sólidas diferentes. No caso do diagrama ferrita-cementita, a reação eutetóide ocorre a partir da austenita que se transforma em ferrita e cementita, fases estáveis a

temperatura ambiente (OLIVEIRA, 2018). A existência dessa reação origina três possíveis classificações para o aço de acordo com o teor de carbono existente, isto é:

1. hipoeutetóides, com teor de carbono abaixo de 0,77%p;
2. eutetóides, com teor de carbono exatamente de 0,77%p, e
3. hipereutetóides, com teor de carbono acima de 0,77%p.

É válido citar que, no diagrama Fe-C, existe ainda uma estrutura composta por lamelas alternadas de ferrita e cementita, como mostra a Figura 2, chamada perlita. Esta estrutura não é uma fase, mas sim uma mistura composta por outras duas fases (LIMA, 2005).

Figura 2 – Microestrutura perlítica, com aumento 2000x e ataque com Nital.



Fonte: LIMA (2005).

Quando um resfriamento lento a partir do campo austenítico é realizado, os aços citados acima podem apresentar diferentes microestruturas, sendo então formados por:

1. hipoeutetóides, ferrita e perlita;
2. eutetóides, perlita, e
3. hipereutetóides, perlita e cementita (LIMA, 2005).

3.4 Processo de Trefilação

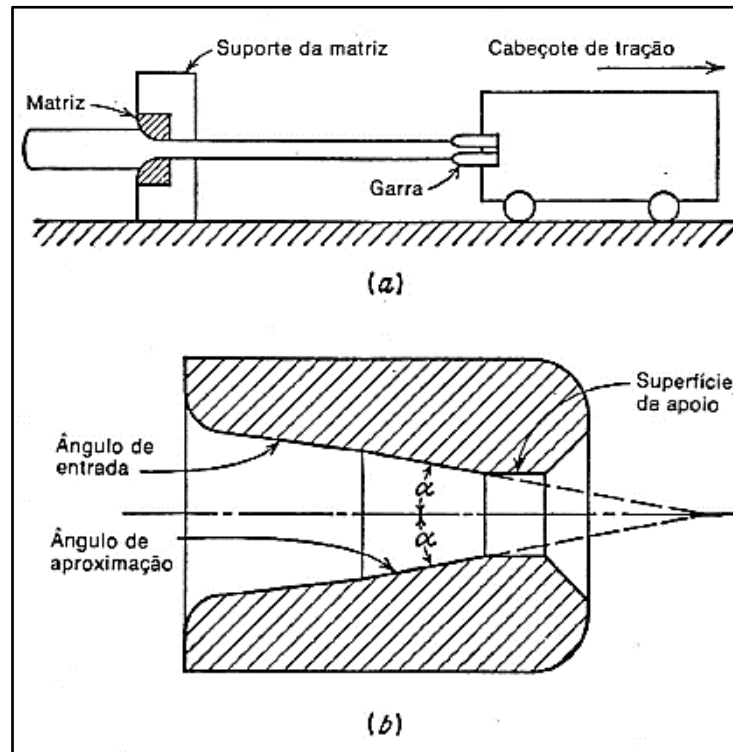
O processo de trefilação pode ser definido como um processo de deformação plástica, no qual há o tracionamento da matéria-prima, que é o fio-máquina, através de uma matriz, resultando numa redução da área na seção transversal do material e aumentando seu comprimento (NUNES, 2008). Este processo é geralmente realizado em temperatura ambiente. Todavia, uma vez que existem grandes deformações envolvidas, ocorre um aumento de temperatura considerável no arame durante a operação (DIETER, 1986), atingindo temperaturas próximas à 200°C. Além disso, esta operação pode ser realizada em diversos passes, através de matrizes dispostas em sequência (NUNES, 2008).

Antes de ser trefilado, é fundamental que o material passe pela etapa de decapagem, química ou mecânica, a fim de remover qualquer carepa remanescente, a qual pode gerar defeitos superficiais no produto ou até um desgaste na matriz (DOMINGUES, 2015). Na decapagem química, após o banho de ácido, o material geralmente é revestido com cal, responsável por neutralizar qualquer ácido restante da decapagem e, também, fornecer aderência entre o material e o lubrificante, que pode ser pó de sabão ou graxa, na trefila por via seca (DIETER, 1986; CORBACHO, 2014). O lubrificante é aplicado visando anular o contato direto entre o material a ser trefilado e a matriz, para que não existam defeitos no produto final, como um arame riscado, por exemplo.

Em cada passe do processo de trefilação, uma matriz que recebe o nome de fieira é utilizada, conforme mostra o desenho esquemático da Figura 3. A matriz, normalmente, é constituída de uma carcaça metálica com o núcleo composto de metal duro e dimensões controladas, sendo ela a responsável por dar a forma desejada ao produto naquele passe (RODRIGUES, 2012). A fieira pode ser melhor descrita em 4 regiões principais, sendo elas: 1) cone de entrada, o qual apresenta um ângulo maior que o ângulo de trabalho e visa facilitar o processo de lubrificação; 2) cone de trabalho, local onde ocorre a deformação do plástico do material, devido à redução de área envolvida no processo; 3) cilindro de calibração, região que define a geometria e dimensões do material que está sendo trefilado e, 4) cone de saída, onde ocorre a recuperação elástica do material e, conseqüentemente, um aumento no diâmetro em relação à região do

cilindro de calibração (COUTO, 2011).

Figura 3 – (a) Desenho esquemático de uma bancada de trefilação. (b) seção transversal de uma matriz (fieira) de trefilação.



Fonte: DIETER (1986).

3.5 Fenômeno de Encruamento

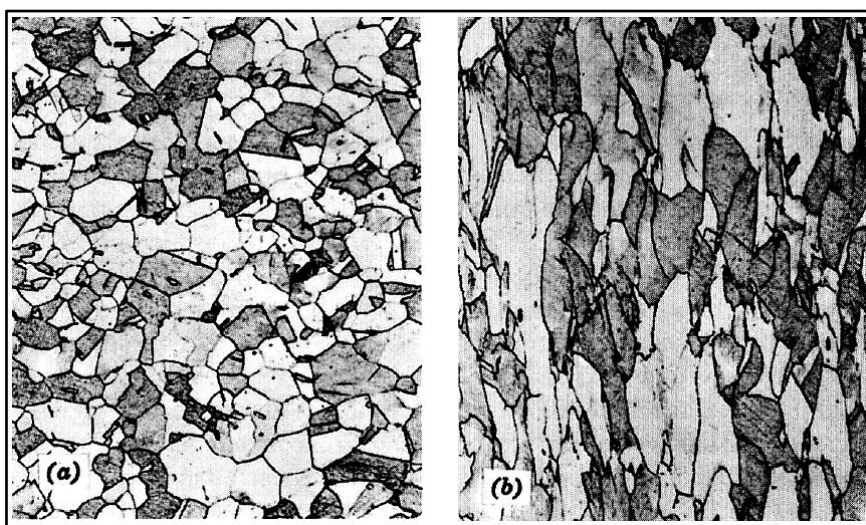
Sabe-se que, durante o processo de trefilação, considerado como um trabalho a frio por ser realizado numa temperatura baixa em relação à temperatura de fusão do metal, os mecanismos de recuperação e recristalização não operam, isto é, à medida que o metal é deformado, ocorre o encruamento, ou seja, a ductilidade do material diminui e sua resistência mecânica aumenta (DIETER, 1986).

O mecanismo de encruamento está associado ao aumento da densidade de discordâncias e a diminuição de sua mobilidade, devido à diminuição da distância entre as mesmas, entendendo-se essa densidade como o comprimento das linhas de discordâncias por unidade de volume (SILVA, 2011). Em outras palavras, o movimento de uma discordância é dificultado pela presença de outras discordâncias. Na medida em

que essa densidade de discordâncias aumenta, a resistência ao movimento das discordâncias causada por outras discordâncias se torna mais evidente e, dessa forma, é necessário aplicar tensões maiores para deformar um material (CALLISTER, 2008).

Modelos de microestruturas obtidas sem e com encruamento, isto é, antes e depois processo de deformação plástica, são mostrados na Figura 4 a seguir.

Figura 4 – Modelo de material policristalino (a) antes da deformação plástica e (b) depois da deformação plástica (microestrutura de grãos alongados).



Fonte: MACHADO (2014).

3.6 Tratamento Térmico de Recozimento

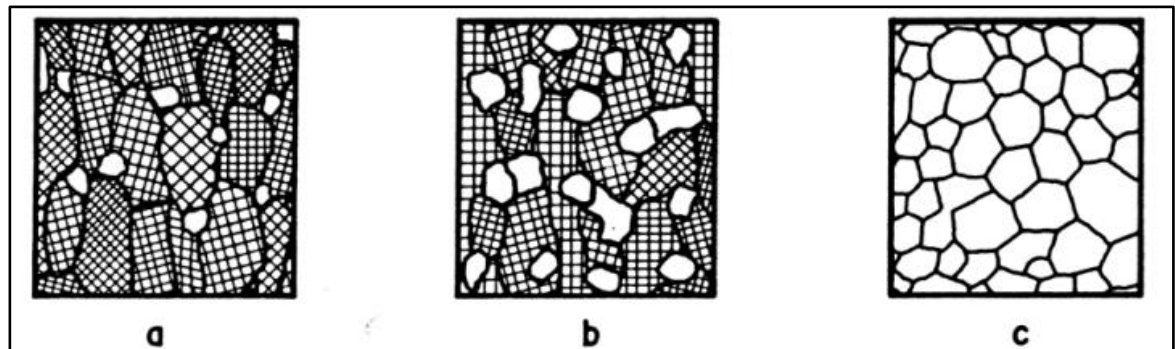
Os efeitos do encruamento podem ser removidos, ou pelo menos diminuídos, mediante a aplicação de um tratamento térmico de recozimento. Isto acontece porque a eliminação de defeitos é um processo ativado termicamente, ou seja, quando há o fornecimento de elevadas temperaturas, a difusão dos átomos é favorecida e, consequentemente, há o favorecimento ao movimento das discordâncias. Ou seja, quando o material é aquecido a uma certa temperatura durante certo tempo, os átomos constituintes têm as condições necessárias para se reorganizarem (MACHADO, 2014).

Este tipo de tratamento térmico consiste no aquecimento do material a uma temperatura elevada, durante um período prolongado, seguido de um resfriamento lento. O recozimento é muito útil, visto que apresenta resultados positivos quando se busca, principalmente:

- remover tensões residuais, provenientes de trabalhos mecânicos de conformação;
- diminuir a dureza para melhorar a usinabilidade do aço e/ou alterar as propriedades mecânicas, como a resistência e a ductilidade; e
- produzir alguma microestrutura específica (CALLISTER, 2008).

A Figura 5 mostra de forma esquemática a evolução microestrutural de um metal submetido a um tratamento térmico de recozimento.

Figura 5 – Tratamento térmico de recozimento. Microestrutura durante (a) Início do tratamento. (b) Metade do tratamento. (c) Final do tratamento.



Fonte: MACHADO (2014).

Divide-se o tratamento térmico de recozimento em três tipos principais:

I. recozimento pleno – tratamento que consiste em austenitizar o aço a uma temperatura da ordem de 50°C acima de A_3 (para os aços hipoeutetóides) e A_1 (para os aços hipereutetóides), indicadas na Figura 1. Os materiais que passam por esse tratamento possuem, em sua microestrutura, perlita grosseira e fases pré-eutetóides, além de apresentarem propriedades como, baixa dureza e boa ductilidade;

II. recozimento subcrítico – tratamento que tem como objetivo melhorar a usinabilidade do material, sendo realizado com um aquecimento abaixo de A_1 para ambos os tipos de aço, hipo ou hipereutetóides. A microestrutura final apresenta, após longos tempos de recozimento, cementita com formato globular;

III. Recozimento intercrítico – tratamento aplicado em aços hipoeutetóides, em temperaturas entre A_1 e A_3 , proporcionando obtenção da microestrutura ferrítica e

martensítica (COSTA E SILVA, 1988).

3.7 Arames Recozidos

Por meio do processo de trefilação é possível obter arames ou fios. Esses produtos apresentam seção transversal uniforme, geralmente circular, muito menor do que seu comprimento. Na prática, esses produtos também podem apresentar seções quadradas, hexagonais, octogonais, ovais, meio-circulares, meio-ovais, triangulares, chatas, entre outras, mas a mais comum é a circular. As dimensões dessa seção variam bastante, entre 0,02 mm até cerca de 25mm (CHIAVERINI, 1990).

Dependendo do metal, e das reduções envolvidas no processo de trefilação, tratamentos térmicos de recozimento podem ser necessários, para obtenção das propriedades mecânicas desejadas (DIETER, 1986). O diagrama de tensão-deformação, mostrado na Figura 6, exemplifica de maneira clara e simples, como as propriedades mecânicas de aços tratados termicamente diferem dos aços encruados. Ou seja, os aços encruados apresentam características de serem muito menos tenazes e mais frágeis, se comparados aos recozidos.

Embora o recozimento aumente os custos de produção do arame ou fio, ele é capaz de fornecer enorme versatilidade no controle microestrutural e, conseqüentemente, das propriedades mecânicas (CATORCENO, 2013). Os arames recozidos são largamente utilizados na construção civil, principalmente para fixar armaduras de concreto armado em obras de diferentes portes, e para amarração de peças industriais. Estes arames são produzidos com aço baixo teor de carbono, o que confere alta maleabilidade e facilidade para aplicações que exigem dobras ou torções (RODRIGUES, 2012). A Figura 7 mostra o aspecto visual de um arame recozido aplicado na construção civil.

Figura 6 – Comparação entre os aspectos do diagrama tensão-deformação de um aço recozido e um aço encruado.



Fonte: SILVA (2011).

Figura 7 – Arame recozido BWG 18 - 1,25 mm.



Fonte: GERDAU (2019).

4. Material e Métodos

4.1 Material

O material analisado é um arame que possui um diâmetro de 1,25 mm, com área de seção transversal reduzida cerca de 90% a partir da matéria-prima (fio máquina), que apresenta baixo teor de carbono (SAE 1010) fornecido pela Gerdau Aços Longos S.A.

4.2 Métodos

4.2.1 Preparação dos Feixes

As amostras de arame foram retiradas do arame trefilado sem recozer, e montadas em formas de feixes com 20 cm de comprimento, aproximadamente. Cada feixe contém cerca de 40 arames, conforme mostra a Figura 8, de forma a realizar uma amostragem do processo de recozimento o mais próximo possível da escala industrial.

Figura 8 – Feixes de arames trefilados 1,25mm.



Fonte: Elaboração própria.

4.2.2 Ciclos Térmicos

As amostras foram separadas em 3 grupos, sendo cada grupo submetido ao tratamento térmico de recozimento em temperaturas e intervalos de tempo pré-determinados, conforme mostra a Tabela 1.

Tabela 1 – Ciclos e tipos de tratamentos térmicos de recozimento em forno mufla para avaliação dos grupos de amostras 1, 2 e 3 de arame 1,25mm.

Grupo	1	2	3
Tipo de Recozimento	Intercrítico	Subcrítico	Subcrítico
Intervalo (min)	Temperatura (° C)	Temperatura (° C)	Temperatura (° C)
40	740	710	690
60	695	680	670
60	650	650	650

Fonte: Elaboração própria.

As temperaturas e patamares escolhidos foram selecionados com a finalidade de simular ao máximo, em um forno do tipo mufla, as condições existentes em um forno contínuo e as temperaturas máximas de recozimento atingíveis por ele. O tratamento térmico se deu então da seguinte maneira: o Grupo 1, submetido a um recozimento intercrítico, permaneceu no forno durante 40 minutos a uma temperatura de 740° C e, após esse intervalo de tempo, foi iniciada a etapa de resfriamento, isto é, o material foi resfriado até uma temperatura de 695° C, na qual permaneceu durante 60 min e, em seguida, foi resfriado novamente até uma temperatura de 650° C, na qual permaneceu por mais 60 min. Por fim, o forno foi desligado e sua porta foi aberta, e o resfriamento continuou até que fosse atingida temperatura ambiente, na qual as amostras foram retiradas para análise. O mesmo ciclo foi seguido para os Grupos 2 e 3, submetidos a recozimentos subcríticos, contudo, as temperaturas utilizadas variam conforme mostra a Tabela 1.

Para a realização dos tratamentos térmicos foram utilizadas, simultaneamente, três fornos do tipo mufla FORNITEC, conforme mostra a Figura 9.

Figura 9 – Forno Mufla FORNITEC.



Fonte: Elaboração própria.

Para garantir confiabilidade e controle dos parâmetros críticos de tratamento térmico (temperatura), foi realizado monitoramento em intervalos de 20 min, com o auxílio de um termopar devidamente calibrado modelo ECIL-M510, conectado a um multímetro ICEL modelo MD6111, e anotados os respectivos valores mostrados no visor da mufla e no multímetro.

Figura 10 – Termopar mineral ligado ao multímetro.



Fonte: Elaboração própria.

4.2.3 Caracterização das Amostras

Em todos os corpos de prova (CPs) foram realizadas medições de seus respectivos valores de diâmetro, com o auxílio de um Micrômetro Digital Mitutoyo calibrado com capacidade de 0-25 mm e resolução 0,001 mm, antes e depois do tratamento térmico.

A fim de analisar, com maior confiabilidade, os resultados obtidos, julgou-se necessário realizar de antemão uma análise estatística a respeito das amostras utilizadas neste trabalho. Para isto, foram feitos Testes de Normalidade de Anderson-Darling, no *software* Minitab, utilizando como base para as análises os valores de diâmetros obtidos por grupo, estes por sua vez obtidos através da medição dos CPs. A partir dos dados, e de acordo com o Teste de Normalidade (*valor p*), mede-se o quanto os dados seguem, ou não, uma distribuição normal e as hipóteses tomadas para esse teste podem ser escritas como:

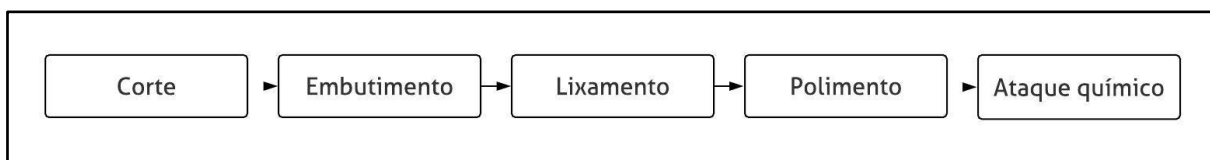
- H_0 : Os dados seguem uma distribuição normal;
- H_1 : Os dados não seguem uma distribuição normal.

Dessa forma, considera-se o valor *p* obtido para testar os dados e se certificar dde que eles realmente vêm de uma distribuição normal, isto é, se todos as medidas observadas apresentam resultados que se enquadram dentro de um intervalo aceitável, caracterizando uma boa população para posteriores análises.

Ensaio mecânicos foram empregados para obtenção do Limite de Resistência à Tração (LRT), e realizados em uma máquina de ensaios universal de marca EMIC, modelo DL20.000. Ao todo, foram ensaiados 120 corpos de prova, de acordo com a NBR ISO 6892, sendo 40 corpos de prova para cada temperatura máxima de recozimento. Os CPs foram cortados em comprimentos de aproximadamente 10 cm para que pudessem ser tracionados. Com os dados experimentais, desenvolveu-se também o Histograma e o Boxplot dos valores de Limite de Resistência à Tração Médios.

A microestrutura do material foi analisada por microscopia óptica (MO). Para isso, amostras foram preparadas metalograficamente, considerando o fluxograma mostrado na Figura 11. De forma aleatória, amostras foram selecionadas de cada grupo a fim de que as microestruturas como recebidas e obtidas, após o recozimento, pudessem ser caracterizadas.

Figura 11 – Fluxograma de preparação das amostras para caracterização microestrutural.

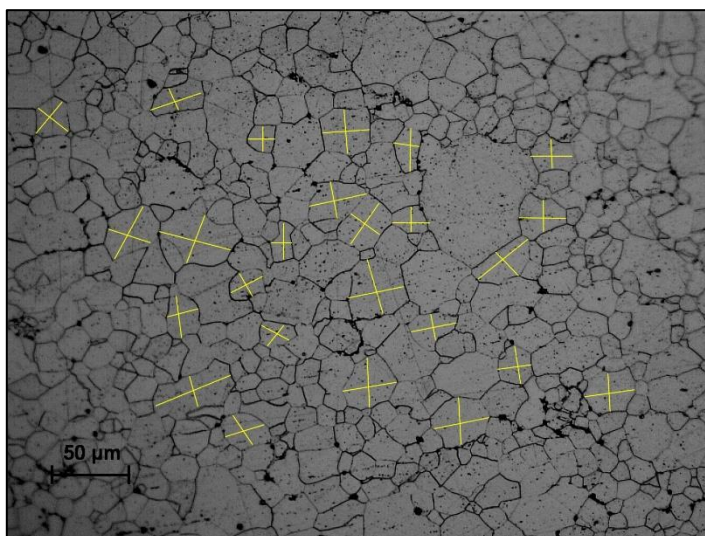


Fonte: Elaboração própria.

Inicialmente, algumas amostras de cada grupo (NT, 1, 2 e 3) foram cortadas com o auxílio de um alicate. A fim de facilitar o manuseio, estas foram embutidas em resina polimérica de cura a frio com tempo de cura variável conforme condições de temperatura do ambiente. Em seguida, as amostras passaram pelo lixamento sequencial numa politriz semiautomática, em baixas rotações, com lixas de granulometrias entre 60, 220, 400 e 600 *mesh*, e fluxo constante de água para lubrificação e remoção das partículas arrancadas durante o procedimento. O polimento foi realizado em pano de polimento com o auxílio de uma suspensão de alumina 1 μm , responsável por eliminar riscos da superfície, facilitando as análises posteriores. Por fim, as amostras sofreram um ataque químico com Nital 3% seguido de lavagem, para revelação microestrutural. As amostras foram caracterizadas via microscopia óptica (*Zeiss*, modelo *Axioscope A1*), possibilitando o estudo das microestruturas dos materiais tratados e, por conseguinte, a comparação dos resultados obtidos.

A partir das micrografias, foram obtidos os tamanhos médios de grão para os Grupos 1, 2 e 3, e seus respectivos desvios com o auxílio do *software* Image J. Para isto, foram realizadas medições em duas diferentes direções de cada grão analisado, totalizando medidas de aproximadamente 25 grãos por amostra estudada para que fosse possível adquirir dados válidos. A exemplificação do método utilizado para a obtenção das medidas está mostrada na Figura 12 a seguir.

Figura 12 – Exemplificação do método utilizado para medição de grãos.
(Grupo 1 – Tratamento Térmico a 740°C. Aumento 250x. Ataque Nital 3%.)



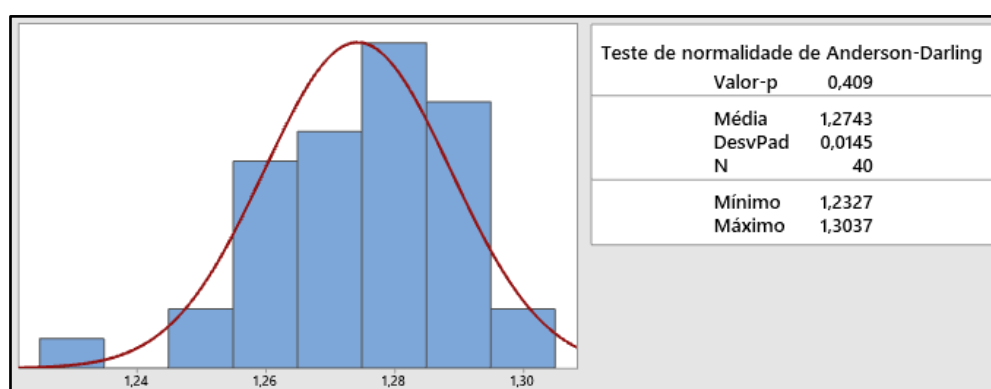
Fonte: Elaboração própria.

5. Resultados e Discussões

5.1 Análise Estatística das Amostras

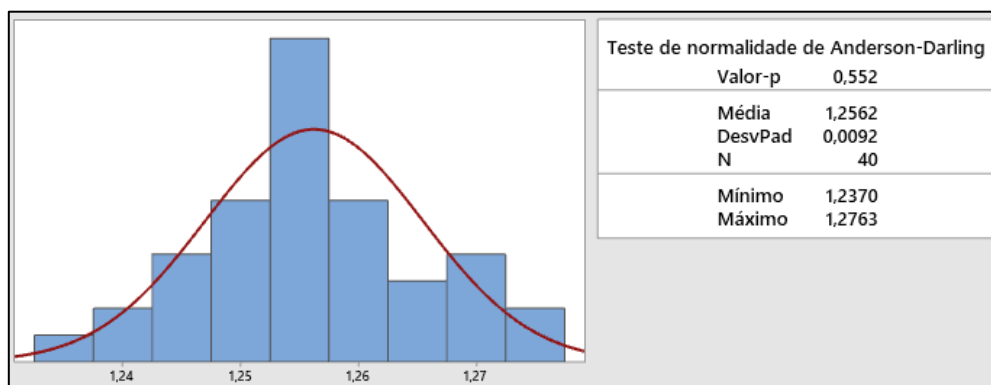
Foram feitos Testes de Normalidade no *software* Minitab, utilizando como base para as análises os valores de diâmetros obtidos por grupo, estes por sua vez obtidos através da medição dos CPs. Tais testes resultaram nas distribuições a seguir e valores mostrados na Tabela 2.

Figura 13 – Diâmetros obtidos das amostras tratadas conforme Grupo 1 (740°C).



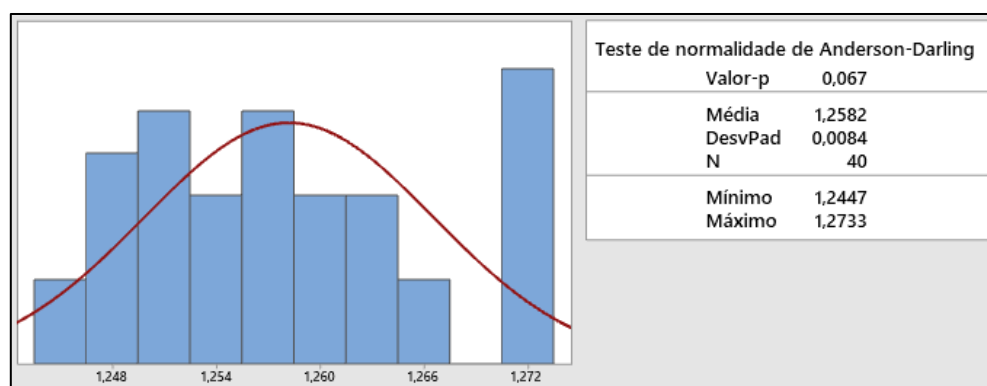
Fonte: Elaboração própria.

Figura 14 – Diâmetros obtidos das amostras tratadas conforme Grupo 2 (710°C).



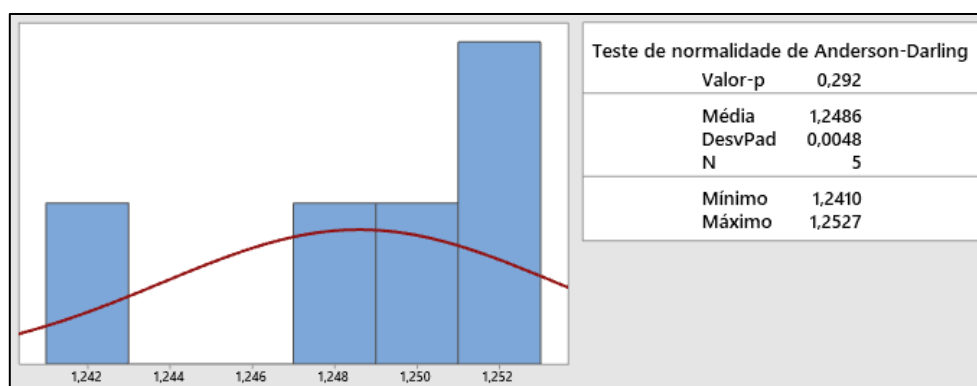
Fonte: Elaboração própria.

Figura 15 – Diâmetros obtidos das amostras tratadas conforme Grupo 3 (690°C).



Fonte: Elaboração própria.

Figura 16 – Diâmetros obtidos das amostras não tratadas termicamente.



Fonte: Elaboração própria.

Tabela 2 – Resultados dos Testes de Normalidade de Anderson-Darling para todos os grupos de amostras analisadas.

Grupo	Valor p
1	0,409
2	0,552
3	0,067
Não Tratadas	0,292

Fonte: Elaboração própria.

De maneira geral, podemos dizer que quando o *valor p* é menor que 0,05, é indicado rejeitar H_0 . Contudo, os resultados obtidos apresentam valores de p maiores que 0,05 em todos os casos, indicando que os dados dos grupos de amostras analisados se comportam conforme uma distribuição normal. Em outras palavras, podemos dizer que os grupos analisados compõem uma boa população para a realização de análises e discussões posteriores, apresentando valores que se encontram dentro de um intervalo aceitável sem desvios que comprometam posteriores análises. Percebe-se, entretanto, que o Grupo 3 apresenta o menor valor de p , estando este bem próximo a 0,05. Acredita-se que o principal motivo associado a este acontecimento seja a existência de um *outlier* que pode observado no final da curva normal, sendo ele o responsável por deslocar a curva, afetando assim o valor de p obtido.

5.2 Caracterização Mecânica

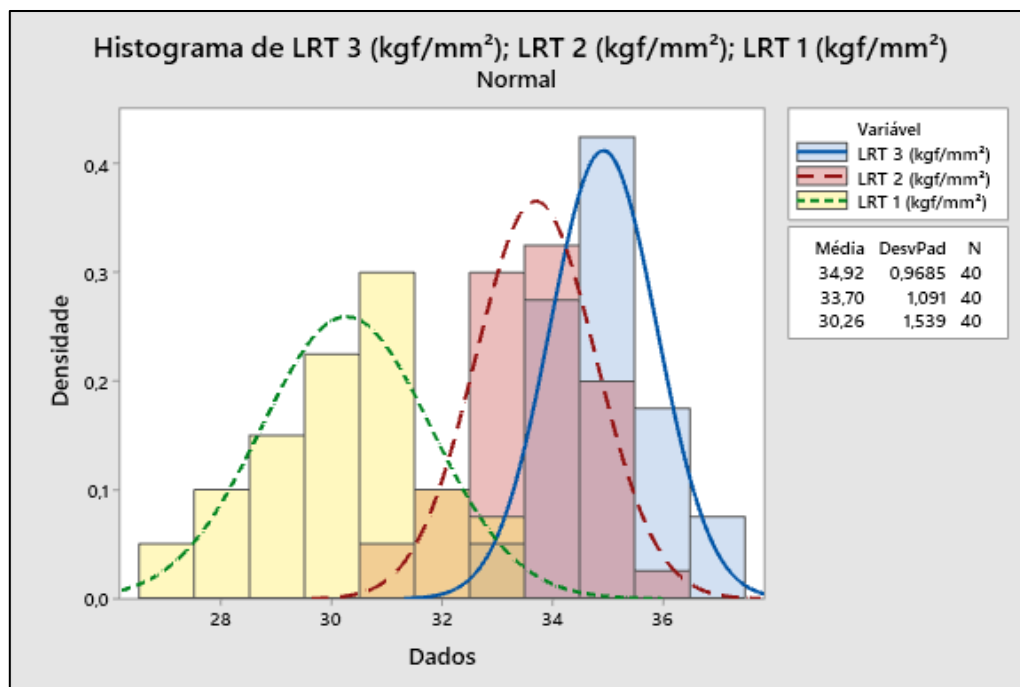
Ao todo foram ensaiados 120 corpos de prova, conforme NBR ISO 6892, sendo 40 amostras para cada temperatura de recozimento analisada. As médias dos valores medidos e resultados obtidos estão descritos na Tabela 3 a seguir. Com os dados, desenvolveu-se também o Histograma e o Boxplot dos valores de Limite de Resistência à Tração, para que, dessa forma, fosse possível visualizar de maneira geral o desempenho das amostras e identificar possíveis outliers. O Histograma e os Boxplots podem ser vistos nas Figuras 17 e 18 a seguir, respectivamente.

Tabela 3 – Diâmetro Médio, Força Máxima Média e Limite de Resistência à Tração Médio para todos os grupos (1, 2, 3 e NT).

Grupo	Diâmetro Médio (mm)		Força Máxima Média (kgf)		Limite de Resistência à Tração Médio (kgf/mm ²)	
	Valor	Desvio Padrão	Valor	Desvio Padrão	Valor	Desvio Padrão
1 (740°C)	1,27	0,01	38,58	1,65	30,26	1,52
2 (710°C)	1,26	0,01	41,76	1,26	33,70	1,08
3 (690°C)	1,26	0,01	43,42	1,14	34,92	0,96
NT	1,25	0,00	113,18	2,62	92,43	2,24

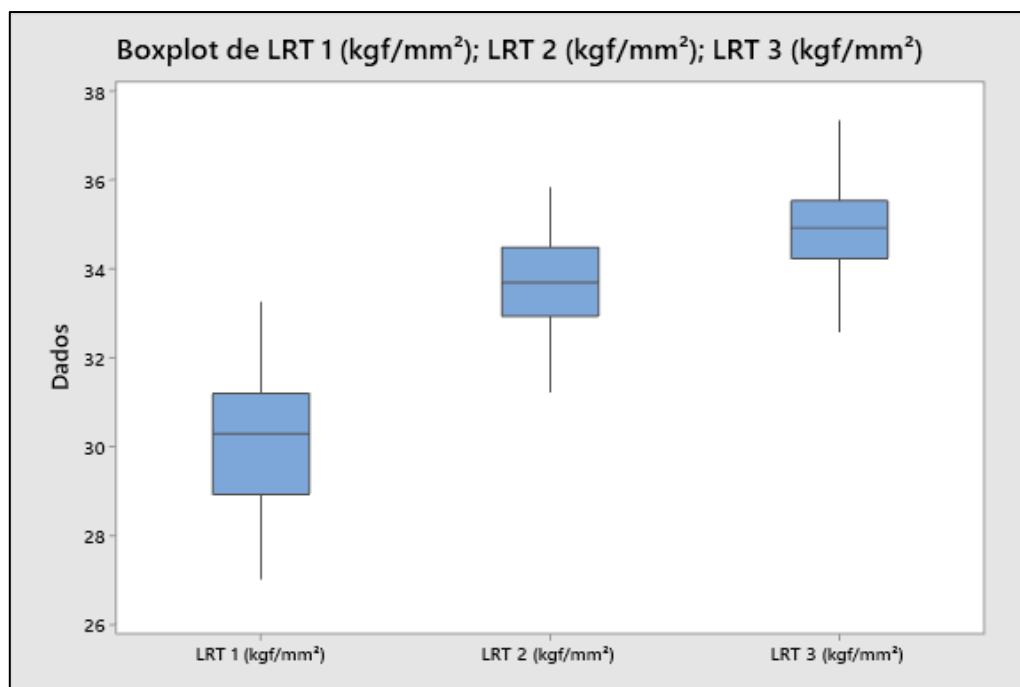
Fonte: Elaboração própria.

Figura 17 – Histograma Limite de Resistência à Tração Médio para os Grupos 1, 2 e 3.



Fonte: Elaboração própria.

Figura 18 – Boxplot Limite de Resistência à Tração para os Grupos 1, 2 e 3.



Fonte: Elaboração própria.

É necessário levar em consideração que, dentre os critérios de aceitação prescritos pela norma ABNT NBR 5589 para arames recozidos com diâmetros de 1,25 mm, o Limite de Resistência à Tração (LRT) deve ser menor que 55 kgf/mm². Conforme é possível visualizar, por meio da Figura e Tabela apresentadas anteriormente, todos os valores de LRT obtidos se encontram dentro do critério pré-estabelecido, atendendo a norma. Além disso, percebe-se que, à medida que cresce a temperatura aplicada durante o tratamento térmico de recozimento, menores são os valores de LRT obtidos. Tal fenômeno era esperado, conforme descrito pela literatura (CHIAVERINI, 1990).

Antes do tratamento térmico, foi constatado através dos ensaios mecânicos de tração que as amostras não tratadas termicamente possuíam um valor de LRT médio de 92,43 kgf/mm², com valores mínimo de 88,49 kgf/mm² e máximo de 94,86 kgf/mm². No entanto, à medida que as amostras foram recozidas, estes valores caíram significativamente (Figura 18), isto é, quando recozidas a 740°C, obtém-se um valor de LRT médio igual a 30,26 kgf/mm²; quando recozidas a 710°C, um LRT médio igual 33,70 kgf/mm² e, quando recozidas a 690°C, um LRT médio igual a 34,92 kgf/mm².

5.3 Caracterização Microestrutural

Amostras foram selecionadas de cada grupo e caracterizadas microestruturalmente com o auxílio do Microscópio Óptico Zeiss, modelo *Axioscope A1*. As imagens a seguir correspondem às seguintes microestruturas:

- não Tratadas Termicamente - Figuras 19 (a) e (b);
- recozidas a 740°C – Grupo 1 - Figuras 20 (a) e (b);
- recozidas a 710°C – Grupo 2 - Figuras 21 (a) e (b), e
- recozidas a 690°C – Grupo 3 - Figuras 22 (a) e (b).

Em algumas imagens a seguir, é possível visualizar pequenos pontos de coloração mais escura que indicam, possivelmente, o início da corrosão nas amostras. Este fenômeno está provavelmente associado ao intervalo de tempo entre o momento em que as amostras sofreram o ataque químico e o momento em que foram analisadas no microscópio, contudo tais pontos não impossibilitam a visualização da microestrutura.

A Tabela 4 a seguir mostra os dados relacionados aos tamanhos médios de grão para os Grupos 1, 2 e 3, e seus respectivos desvios.

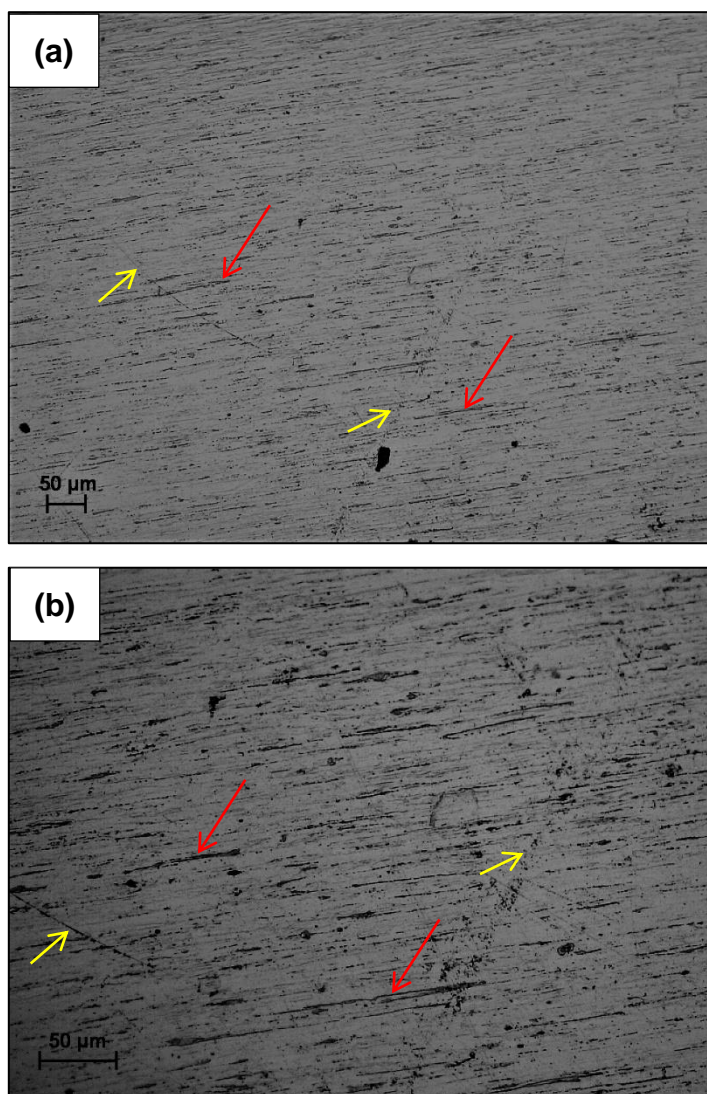
Tabela 4 – Tamanhos Médios de Grão obtidos para os Grupos 1, 2 e 3.

Grupo	Tamanho Médio de Grão (μm)	Desvio Padrão
1 (740°C)	37,93	8,94
2 (710°C)	27,52	7,82
3 (690°C)	17,29	4,14

Fonte: Elaboração própria.

As microestruturas da amostra não tratada termicamente (Figuras 19 (a) e (b)) revelam um material severamente encruado, com grãos altamente alongados e orientados no sentido do processo de trefilação, sendo este o responsável por tensionar fortemente o arame, resultando na microestrutura obtida. Além disso, é possível verificar a variação de tonalidade em algumas regiões da amostra, indicando a possível formação de uma pequena fração de fase perlítica na amostra durante a trefilação do material (setas vermelhas), fenômeno comum neste tipo de processo que é eliminado posteriormente durante recozimento. Também é possível visualizar alguns riscos provenientes do polimento, os quais se encontram em direções diferentes do sentido da trefilação (setas amarelas), indicando possíveis erros durante a preparação do material para análise.

Figura 19 – Amostra trefilada sem tratamento térmico (a) com aumento 125x. (b) com aumento 250x. Ataque Nital 3%.

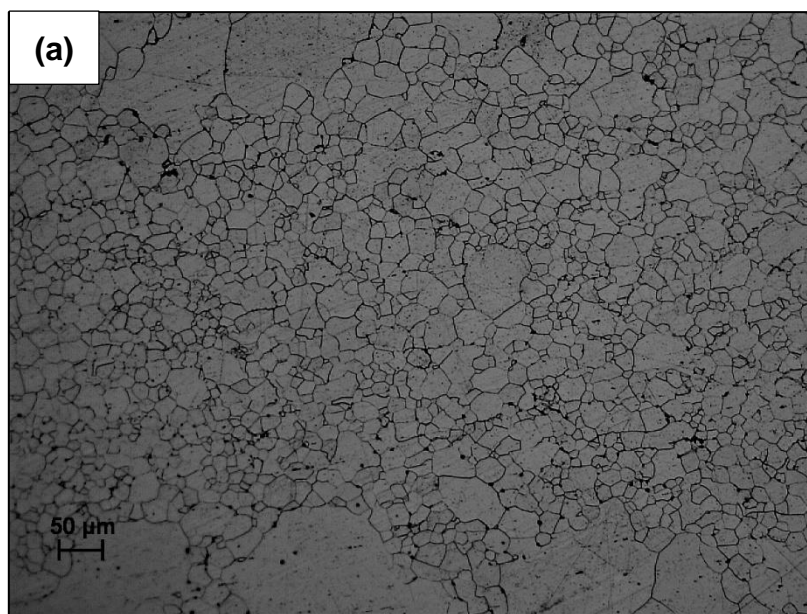


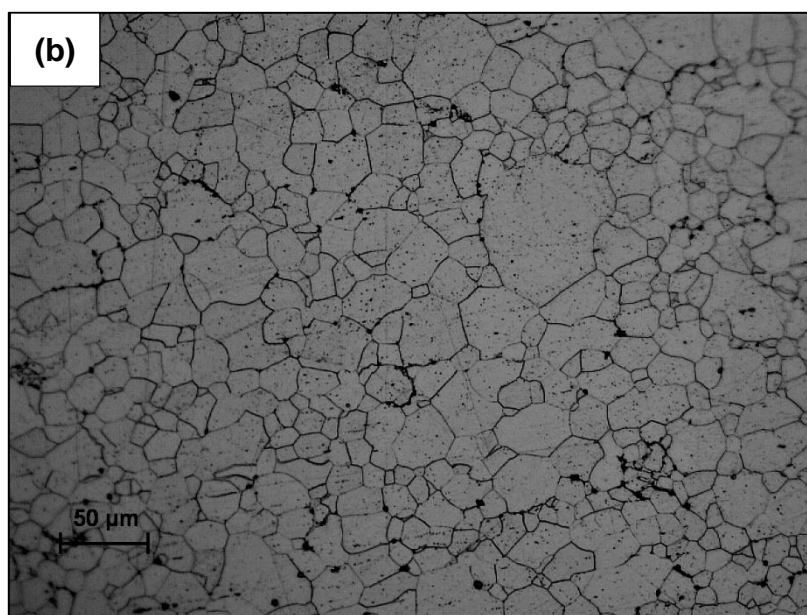
Fonte: Elaboração própria.

As micrografias obtidas para o arame recozido a 740°C (Figuras 20 (a) e (b)) apresentam uma microestrutura predominantemente ferrítica, com grãos mais arredondados, definidos e que possuem um tamanho médio de 37,93 μm . Esta mudança microestrutural de grãos altamente orientados no sentido de trefilação para grãos mais arredondados e definidos, está associada, principalmente, aos fenômenos de recristalização e recuperação, conforme discutido anteriormente. Estes fenômenos são ativados pela temperatura fornecida pelo tratamento térmico de recozimento, favorecendo a difusão de átomos, sua reorganização e, conseqüentemente, a movimentação das discordâncias. É possível ainda visualizar, nas extremidades da amostra, uma certa heterogeneidade quanto ao tamanho dos grãos em relação aos centrais. Em outras palavras, os grãos na região central aparentam ser menores que os grãos localizados na extremidade. Este acontecimento pode estar associado ao carbono que não se difundiu para a superfície da amostra e atuou evitando o crescimento dos grãos centrais, resultando nesta diferença encontrada na microestrutura (CASTRO, 2000).

Figura 20 – Amostra recozida a 740°C (a) com aumento 125x. (b) com aumento 250x.

Ataque Nital 3%.

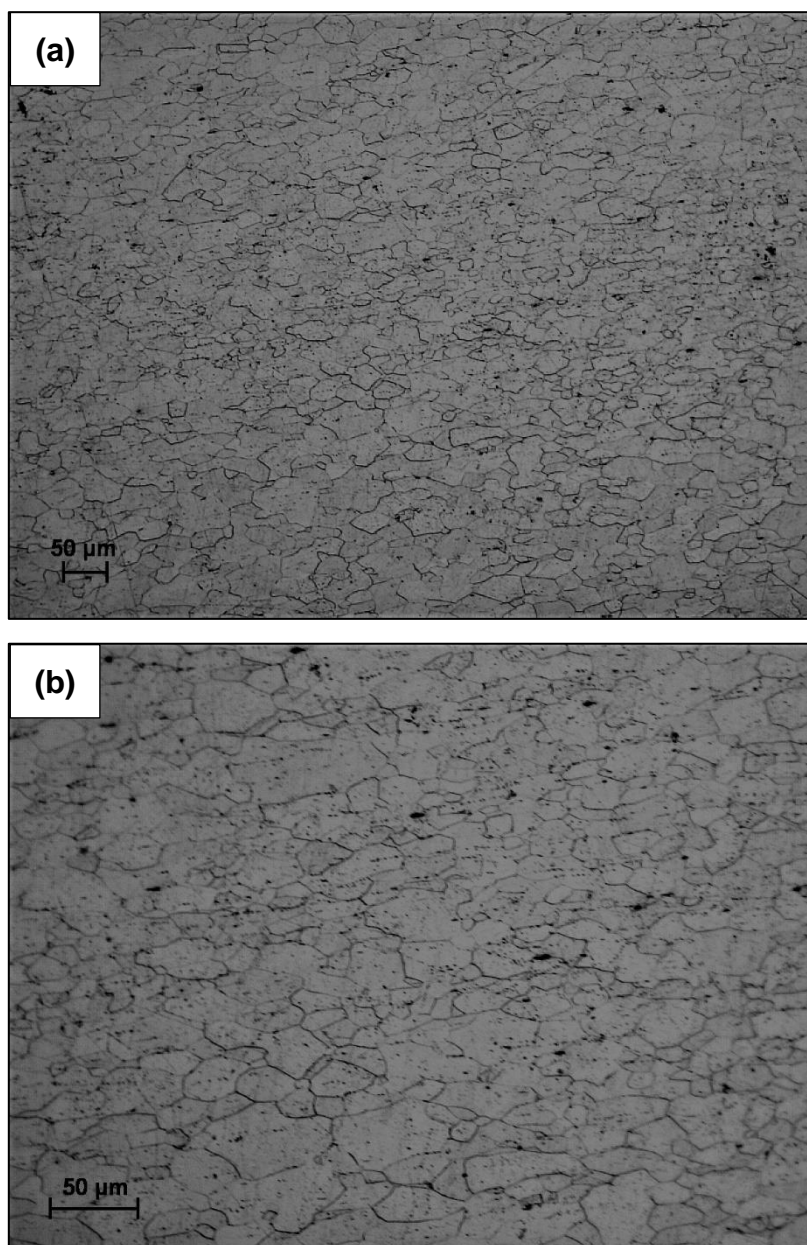




Fonte: Elaboração própria.

As micrografias obtidas para o arame recozido a 710°C (Figuras 21 (a) e (b)) também apresentam uma microestrutura predominantemente ferrítica, com grãos mais arredondados e definidos, contudo menores que os anteriores, apresentando um tamanho médio de 27,52 μm. É válido ressaltar que, quanto menores são os tamanhos de grão, mais contornos de grãos existem e, desta forma, menos discordâncias podem ser empilhadas ao longo de um contorno, diminuindo a concentração de tensões e dificultando a liberação de fontes de discordâncias no grão vizinho, o que resulta na modificação de propriedades mecânicas no metal, como o aumento de dureza ou do limite de resistência à tração, por exemplo (ABBASCHIAN, 2010). Julga-se importante mencionar que o tempo de ataque químico para a amostra do Grupo 2 aparenta ter sido menor que o necessário, acarretando em micrografias com a microestrutura não totalmente revelada, ponto indispensável caso seja necessário realizar outras análises.

Figura 21 – Amostra recozida a 710°C (a) com aumento 125x. (b) com aumento 250x.
Ataque Nital 3%.

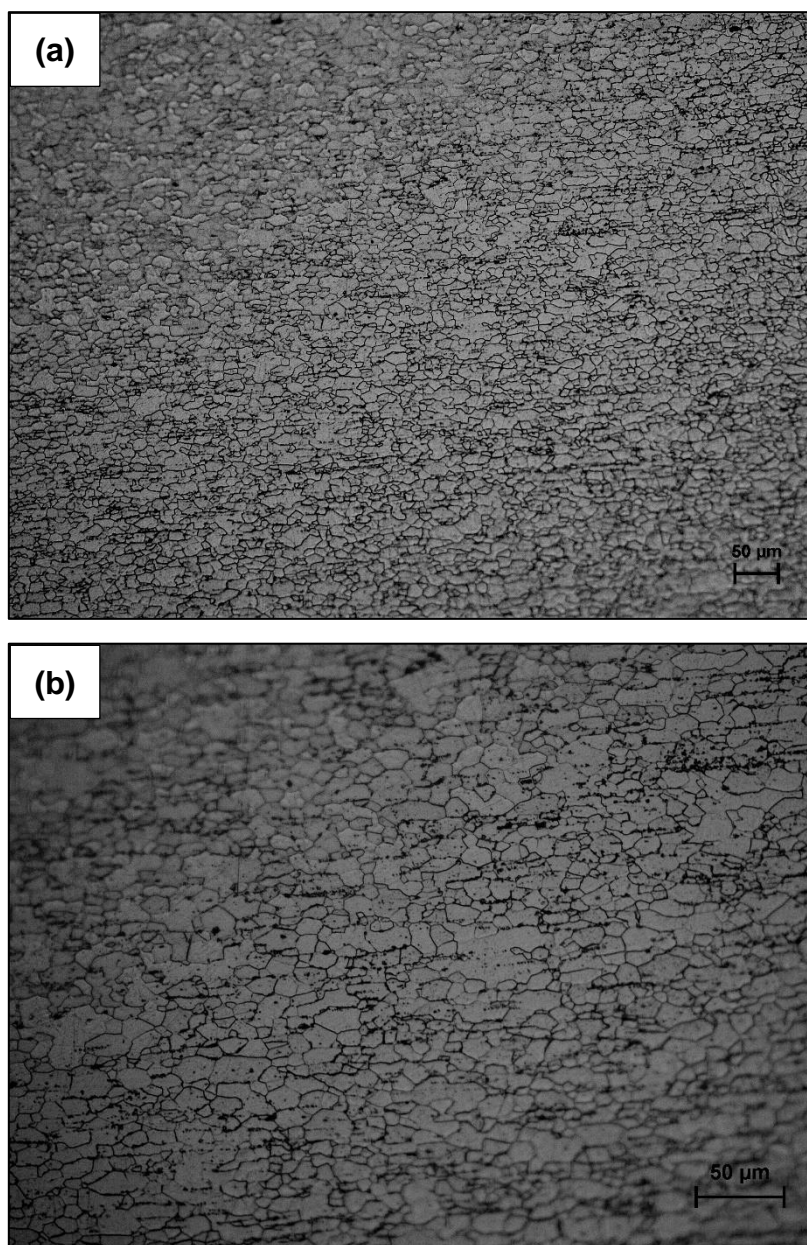


Fonte: Elaboração própria.

Da mesma forma como foram discutidos os fenômenos que explicam o comportamento das microestruturas e propriedades mecânicas anteriores é possível compreender as micrografias obtidas para o arame recozido a 690° C (Figuras 22 (a) e (b)). Estas apresentam uma microestrutura predominantemente ferrítica, com grãos mais

arredondados, homogêneos e definidos, contudo menores que os anteriores, apresentando um tamanho médio de 17,29 μm .

Figura 22 – Amostra recozida a 690°C (a) com aumento 125x. (b) com aumento 250x.
Ataque Nital 3%.



Fonte: Elaboração própria.

De maneira geral, à medida que a temperatura máxima aplicada no tratamento térmico de recozimento aplicado foi aumentada, visualizou-se com bastante facilidade um aumento no tamanho médio de grão obtido e uma diminuição no valor do limite de resistência à tração médio medido. Infere-se desta forma que todos os ciclos de tratamento propostos atenderam o critério de aceitação para valores de limite de resistência à tração de acordo com a norma ABNT NBR 5589 para arames de aço de baixo teor de carbono, sendo o Grupo 1 o mais eficaz, visto que este apresenta os menores valores de Limite de Resistência à Tração Médio medido e, além disso, apresentou um valor de desvio padrão que determina um intervalo de resultados confiáveis para aplicação no ramo da construção civil.

6. Conclusões

Conclui-se que a temperatura máxima de recozimento influencia diretamente nas propriedades mecânicas e no comportamento microestrutural de arames de aço baixo carbono. De forma geral, à medida de que a temperatura máxima de recozimento era aumentada, as amostras apresentavam menores valores de limite de resistência à tração médio e maiores tamanhos médios de grãos em suas respectivas microestruturas.

O Grupo 1 (amostras tratadas a 740°C) mostrou-se como o grupo mais eficaz e promissor devido ao seu menor valor de LRT médio, seguido pelo Grupo 2 (amostras tratadas a 710°C), que apresentou valor intermediário de LRT médio e, por fim, pelo Grupo 3 (amostras tratadas a 690°C), que apresentou o maior valor de LRT médio obtido. Ainda assim, como já foi dito, todos os resultados encontrados para os grupos se encontram dentro dos critérios estabelecidos pela ABNT NBR 5589.

A partir dos resultados obtidos, foi possível implementar no forno contínuo em análise um ciclo térmico que garantisse as propriedades desejadas, atendendo à norma para os arames recozidos. Além disso, este aumento de velocidade gerou, por sua vez, uma redução no tempo gasto para realizar o tratamento térmico de recozimento no material estudado, resultando num ganho de produtividade da ordem de 10% em relação ao ciclo anterior.

Deve-se ainda considerar que, os valores estudados foram obtidos em nível laboratorial, sob atmosfera não inerte, para apenas um grupo de material que possui a etapa de Recozimento em seu processo. Considera-se uma grande oportunidade o estudo mais aprofundado dos ciclos térmicos para outros materiais que também possuem esta etapa em seu processo, visando aumentar ainda mais a produtividade do processo e a redução de custos operacionais – como energia para atingir altíssimas temperaturas – sem deixar de garantir as propriedades mecânicas necessárias, previstas por normas, para a aplicação desejada na construção civil.

7. Referências

Abbaschian, R.; Abbaschian, L.; Reed-Hill, R.E.; **Principles of Physical Metalurgy**. CL-Engineering; 4 Edition, 2010.

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 5589 – Arames de aço baixo teor de carbono – Requisitos.**, 2012.

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR ISO 6892 – Materiais metálicos – Ensaio de tração à temperatura ambiente.** 2002.

CALLISTER, W. D.; **Ciência e Engenharia de Materiais: Uma introdução**. 7º Edição, 2008.

CASTRO, K. E.; **Influência da microestrutura e composição química nas propriedades mecânicas e magnéticas de chapas de aço utilizadas para fins elétricos**. Dissertação de Metrado, Universidade Federal de Santa Catarina; Florianópolis, 2000.

CATORCENO, L. L. C.; **Estudo do encruamento, recristalização e crescimento de grão em chapa de liga de magnésio AZ31B (Mg – 3% Al – 1%Zn – 0,3%Mn)**. Tese de Doutorado, Escola Politécnica da Universidade Federal de São Paulo; São Paulo, 2013.

CHIAVERINI, V.; **Aços e Ferros Fundidos**. 6º Edição, 1990.

CORBACHO, R. S.; **Análise da viabilidade técnica do processo de remoção do óxido de ferro através da decapagem mecânica na trefilação do aço ABNT 1075**. Dissertação de Mestrado, Faculdade de Tecnologia SENAI CIMATEC; Salvador, 2014.

COSTA E SILVA, A.L.; MEI, P. R.; **Aços e Ligas Especiais**. 2º Edição, 1988.

COUTO, G. A.; **Efeito do ângulo da fieira na geometria e propriedades mecânicas de barras trefiladas**. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Minas Gerais; Belo Horizonte, 2011.

DIETER, G. E.; **Metalurgia Mecânica**. 2º Edição, 1981.

DOMINGUES, D. F.; **Otimização do processo de decapagem química numa empresa de produção de perfis de aço**. Dissertação de Mestrado, Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra; Portugal, 2015.

FLERY, M. T. L.; **Cultura da qualidade e mudança organizacional**. Revista de Administração de Empresas; São Paulo, 1993.

GERDAU; **Catálogo Construção Civil**. 2019. Disponível em: <<https://www2.gerdau.com.br/produtos/arame-recozido>>. Acesso em: 29/05/2019.

IMIANOWSKY, G. W., WALENDOWSKY, M. A.; **OS PRINCIPAIS AÇOS CARBONO UTILIZADOS NA CONSTRUÇÃO CIVIL**. Conselho Regional de Engenharia e Agronomia de Santa Catarina; Santa Catarina, 2017.

LIMA, C. R. P.; **Introdução à metalografia dos aços carbono**. Universidade Estadual de Campinas. Campinas, 2005. 19 p.

MACHADO, I. F. **Tratamentos térmicos e de superfície**. Notas de Aula – Introdução à Manufatura Mecânica (PMR2202), Escola Politécnica da Universidade de São Paulo; 2014.

MINITAB 18. **A estatística de Anderson-Darling**. Support Minitab 18, [s.d.]. Disponível em: <<https://support.minitab.com/pt-br/minitab/18/help-and-how-to/statistics/basic-statistics/supporting-topics/normality/the-anderson-darling-statistic/>>. Acesso em: 28 de out. de 2019.

NUNES, R. M.; **Análise de tensões residuais no processo de trefilação combinada do aço AISI 1048 visando minimizar distorções pós processamento**. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Rio Grande do Sul; Porto Alegre, 2008.

OLIVEIRA, A. M.; **Um estudo da influência do teor de carbono sobre propriedades de tração de ligas de aço**. Trabalho de Conclusão de Curso, Universidade Federal Rural do Semi-Árido; Rio Grande do Norte, 2018.

RODRIGUES, R. A.; **Comparativo entre o fio máquina produzido com aço SAE 1005 e SAE 1405 modificados para produção de arames recozidos**. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Rio Grande do Sul; Porto Alegre, 2012.

SILVA, T. F.; **Efeito dos parâmetros de trefilação nas propriedades mecânicas e microestruturais do aço SAE 1015 trefilado**. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Ceará; Fortaleza, 2011.

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO PAULO.; **Manual de normalização de trabalhos acadêmicos**. Biblioteca da Escola de Filosofia, Letras e Ciências Humanas. 2. ed. - Guarulhos: Biblioteca da Escola de Filosofia, Letras e Ciências Humanas, 2012. Disponível em <<https://goo.gl/RWeLpe>>. Acesso em: 07 mar. 2017.

WORLDSTEEL.; **World Steel in Figures 2018**. Brussels, 2018.